9. Blagodatn Yu. V., Yatsenko A. A., Zakharov B. A., Chegodaev V. D., Alekseeva L. I. Processing of nonferrous and noble metals from new sources. *Tsvetnye Metally*. 2003. No. 8-9. pp. 24–30.
10. Petrov S. V., Alekseev I. A., Shelukhina Yu. S. Applied mineralogy of PGM at low-sulfide deposit type. *Problems of geology and exploitation of platinum metal deposits : Proceedings of All-Russian conference with international participation*. Saint-Petersburg : Izdatelstvo SPGU. 2016. pp. 160–167.
11. Petrov S. V. Upon dependence of platinum-group metals flotation recovery on metals grade in ore. *Obogashchenie Rud*. 2015. No. 5. pp. 14–19. DOI: 10.17580/or.2015.05.03
12. Song Z. G., Corin K. C., Wiese J. G., O'Connor C. T. Effect of different grinding media composition on the flotation of a PGM ore. *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 124. pp. 74–76.
13. O'Connor C., Wiese J., Corin K., McFadzean B. On the Management of Gangue Minerals in the Flotation of Platinum Group Minerals. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019. Vol. 36, Iss. 1. pp. 55–62.
14. Serdyuk S. S., Kirilenko V. A. Geology and potential gold content in the south of the South Yenisei ore province. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Ser. Tekhnika i tekhnologii*. 2013. Vol. 6, No. 8. pp. 968–994.
15. Ignatkina V. A. Selective reagent regimes of flotation of non-ferrous and noble metal sulfides from refractory sulfide ores. *Tsvetnye Metally*. 2016. No. 11. pp. 27–33. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.03
16. Lavrinenko A. A., Sarkisova L. M., Glukhova N. I., Shrader E. A., Moshonkin S. A. Use of a composition sulfhydryl collectors in the flotation of poor pgm–copper–nickel raw materials. *GAB*. 2015. No. 9. pp. 80–87.
17. Chanturiya V. A., Bocharov V. A. Modern state and basic ways of technology development for complex processing of non-ferrous mineral raw materials. *Tsvetnye Metally*. 2016. No. 11. pp. 11–18. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.01
18. Corin K. C., Bezuidenhout J. C., O'Connor C. T. The role of dithiophosphate as a co-collector in the flotation of a platinum group mineral ore. *Minerals Engineering*. 2012. Vol. 36-38. pp. 100–104.
19. Buckley A. N., Hope G. A., Parker G. K., Steyn J., Woods R. Mechanism of mixed dithiophosphate and mercaptobenzothiazole collectors for Cu sulfide ore minerals. *Minerals Engineering*. 2017. Vol. 109. pp. 80–97.
20. Mukhina T. N., Marchevskaya V. V. Improvement of the flotation regime for low-sulfide platinum-metal ores of the Kola Peninsula. *Obogashchenie Rud*. 2018. No. 4. pp. 20–27. DOI: 10.17580/or.2018.04.05
21. Dyachenko V. T., Mantsevich M. I., Bryukvin V. A., Tsybin O. I. Combined technology of processing of impregnated copper-nickel ores. *Tsvetnye Metally*. 2015. No. 2. pp. 25–28.
22. Kroll-Rabotin J.-S., Sanders R. S. Implementation of a model for Falcon separation units using continuous size-density distributions. *Minerals Engineering*. 2014. Vol. 62. pp. 138–141.

УДК 622.7

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РУДОПОТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ПРЕДКОНЦЕНТРАЦИИ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

С. В. ТЕРЕЩЕНКО,
зав. лабораторией, д-р техн. наук,
s.tereshchenko@ksc.ru

Д. Н. ШИБАЕВА,
старший научный сотрудник, канд. техн. наук

Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

Введение

Современное горное производство функционирует в сложных горно-геологических условиях, в результате чего на переработку поступает рудная масса, качество которой не всегда отвечает прогнозным данным. Поддерживать в таких условиях высокие технологические показатели процесса обогащения весьма затруднительно. Кроме того, подобная ситуация может приводить к росту негативного воздействия горного производства на окружающую среду за счет увеличения объемов измельченного материала

Сформулированы теоретические положения, обеспечивающие принятие обоснованного решения по использованию кусковой сепарации процесса предконцентрации в технологической цепи добычи и переработки полезных ископаемых. На базе результатов исследований по использованию процесса кусковой сепарации апатитсодержащих, железных, хромитовых и лопаритовых руд продемонстрирована возможность повышения качества рудопотока, направляемого на обогатительные фабрики, не менее чем в 1,3 раза за счет выделения не менее 20 % пустых и слабоминерализованных пород при сохранении высоких показателей извлечения полезных компонентов.

Ключевые слова: предконцентрация, кусковая сепарация, магнитные методы, гравитационные методы, радиометрические методы, модуль крупности, показатель контрастности, показатель наличия пустых пород.

DOI: 10.17580/gzh.2020.09.08

в хвостохранилищах, что противоречит основным положениям стратегии государства в области экологического развития Российской Федерации.

Таким образом, в существующих условиях возникает острая необходимость использования технологий добычи и переработки минерального сырья, создающих условия для эффективного и максимально полного извлечения полезных ископаемых из недр. При этом такие технологии должны соответствовать следующим требованиям: быть высокопроизводительными;

исключать существенные колебания качества рудной массы в питании обогатительных фабрик; обеспечивать минимальные потери полезных компонентов (ПК) по всему технологическому циклу; быть экологически сбалансированными и экономически эффективными.

Обеспечить реализацию вышеперечисленных требований к таким технологиям — задача сложная. Одним из путей ее решения, направленных на устранение колебаний содержания ПК и обеспечение стабильного состава рудопотока в питании обогатительных фабрик, является процесс предварительной концентрации (в дальнейшем — предконцентрации) посредством сепарации кускового материала на рудный и породный продукты. В результате ее применения появляется возможность формирования перед процессами обогащения технологического потока регламентированного качества путем удаления из него пустых и слабоминерализованных пород, содержание ПК в которых ниже бортового содержания ПК, принятого при добыче.

Реализовать процесс предконцентрации можно, используя для этого магнитные, гравитационные и радиометрические свойства основных породообразующих минералов добытого кускового материала горной массы [1–5].

Основные положения теории предконцентрации руд

Процесс предконцентрации, направленный на удаление из горной массы, поступающей на обогащение, части пустых и слабоминерализованных пород, независимо от используемых для его реализации методов, может быть эффективно применен, если объемы горной массы, а именно ее куски, различаются по содержанию в них ПК; в сепарируемом материале присутствуют куски с содержанием ПК ниже бортового значения; модуль крупности разделяемого материала (отношение максимального D к минимальному размеру куска d в этом классе) обеспечивает эффективное разделение горной массы на рудный и породный продукты.

Данные положения относятся к основным факторам, влияющим на качество рудной массы, и являются необходимыми и достаточными условиями для проведения теоретической оценки целесообразности применения процессов предконцентрации на изучаемом объекте.

В основу оценки неравномерности распределения ПК в кусковом материале горных пород, независимо от метода реализации процесса предконцентрации, положена теория контрастности руд по содержанию в них ПК [6]. Безразмерным количественным показателем, характеризующим уровень неравномерности содержания ПК в кусковом материале горных пород, служит *показатель контрастности M* :

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n |c_i - \alpha| \gamma_i}{100\alpha}, \quad (1)$$

где c_i — содержание ПК в конкретном куске горной массы, %; α — среднее содержание ПК в изучаемой пробе, %; γ_i — выход (доля) конкретного куска рудной массы в изучаемой пробе, %; n — число кусков в пробе.

Показатель M определяет уровень различия сепарируемых кусков по содержанию в них ПК c_i относительно среднего содержания ПК α по изучаемому объекту — пробе.

Классификация по обогатимости руд в зависимости от значения показателя M [6], по мнению авторов, не вполне корректна, поскольку его значение характеризует лишь уровень неравномерности содержания ПК в кусках горной массы и свидетельствует о возможности формирования продукта разделения, представленного кусками с содержанием ПК ниже среднего α .

Устранить этот недостаток теории предконцентрации руд позволяет использование другого безразмерного показателя — *наличия пустых пород N* [7], значение которого определяется по формуле

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i - \theta) \gamma_i}{\sum_{i=1}^n |c_i - \theta| \gamma_i}, \quad (2)$$

где θ — бортовое содержание ПК, принятое при добыче.

Величина показателя N свидетельствует о присутствии или отсутствии в горной массе пустых и слабоминерализованных пород. Значение показателя наличия пустых пород, равное единице ($N = 1$), свидетельствует о том, что в рудной массе, поступающей на сепарацию, отсутствуют пустые и слабоминерализованные породы, в связи с чем реализация процесса предконцентрации теряет смысл. Факт снижения значения показателя наличия пустых пород ($N < 1$) обуславливает присутствие в руде некоторого количества пустых и слабоминерализованных пород, и чем меньше его значение, тем больше в руде породных кусков. Такой вывод может являться основанием для принятия решения о целесообразности реализации процесса предконцентрации. Однако невозможно дать однозначного заключения об эффективности операции разделения на основании лишь значения показателя N , поскольку в ряде случаев выделение породной составляющей, например для бедных, тонковкрапленных руд, характеризующихся низкой контрастностью по содержанию ПК, не представляется возможным.

Таким образом, только совместный анализ двух показателей — M и N может дать однозначный ответ о целесообразности применения процесса предконцентрации на конкретном объекте.

Следующим положением, влияющим на реализацию процесса предконцентрации, является выбор модуля крупности кусков сепарируемого материала. Рассмотрим необходимость выполнения этого положения при предконцентрации руд посредством магнитных, гравитационных и радиометрических методов.

Для эффективного использования магнитных методов предконцентрации необходимо, во-первых, чтобы выполнялось условие [8]

$$F_{3M}'' < F_K'' \leq F_K' < F_{3M}', \quad (3)$$

где F_{3M}'' — равнодействующая магнитных сил, возникающих в кусках, притягиваемых к магнитным полюсам сепаратора; F_{3M}' — то же, для кусков, не притягиваемых к полюсам, т. е. переходящих в немагнитную фракцию; F_K и F_K' — равнодействующие сил,

конкурирующих с магнитными силами, которые действуют на куски притягиваемой и непритягиваемой фракций.

Во-вторых, модуль крупности кускового материала в сепарируемом классе должен обеспечивать выделение кусков с исключительно кондиционным содержанием ПК, независимо от их размера в пределах сепарируемого класса. При реализации процесса предконцентрации посредством сухой магнитной сепарации с использованием, например, барабанных магнитных сепараторов для снижения потерь кусков со значениями магнитной восприимчивости χ , соответствующими кондиционному содержанию ПК, а также предупреждения загрязнения концентрата кусками, значения χ которых характеризуют куски с содержанием ПК, равным и ниже бортового, необходимо выполнение условия «равнонамагничиваемости» разноразмерных частиц D и d [7]:

$$\frac{(F'_M)_D}{(F'_K)_D} = \frac{(F''_M)_d}{(F''_K)_d}, \quad (4)$$

где F'_M — равнодействующая магнитных сил притяжения куска размером D ; F''_M — равнодействующая магнитных сил притяжения куска размером d ; F'_K и F''_K — равнодействующие сил, конкурирующих с магнитными силами, которые действуют на куски размерами D и d .

Конкурирующие силы в случае барабанного сепаратора являются силой тяжести F_T и центробежной силой $F_{\text{ц}}$. Тогда условие (4) принимает вид:

$$\frac{(\chi)_D c H_0^2 e^{-2cD}}{(F_T)_D + (F_{\text{ц}})_D} = \frac{(\chi)_d c H_0^2 e^{-2cd}}{(F_T)_d + (F_{\text{ц}})_d} \quad \text{или} \quad \frac{(\chi)_D c H_0^2 e^{-2cD}}{(Mg)_D + \left(\frac{Mv^2}{R}\right)_D} = \frac{(\chi)_d c H_0^2 e^{-2cd}}{(mg)_d + \left(\frac{mv^2}{R}\right)_d}, \quad (5)$$

где c , χ — магнитная восприимчивость куска, 10^{-9} см³/г; H_0 — напряженность магнитного поля на поверхности барабана сепаратора; M — масса куска размером D , кг; m — масса куска размером d , кг; g — ускорение свободного падения, м/с²; v — скорость движения барабана, м/с; R — диаметр барабана, м.

Из равенства (5) следует условие «равнонамагничиваемости» разноразмерных частиц D и d :

$$\frac{1}{2c} \ln \left[\frac{M}{m} \cdot \frac{(\chi)_D}{(\chi)_d} \right] = (D - d). \quad (6)$$

Следовательно, для снижения потерь с хвостами сепарации кондиционных по содержанию магнетита кусков и минимизации загрязнения концентрата кусками со значениями магнитной восприимчивости, соответствующей бортовому содержанию магнетита и ниже, необходимо, чтобы разница в размерах разделяемых минеральных агрегатов не превышала $\frac{1}{2c} \ln \left[\frac{M}{m} \cdot \frac{(\chi)_D}{(\chi)_d} \right]$.

В противном случае для кусков, различных по крупности ($D/d > 2,5$), но с одинаковой магнитной восприимчивостью, сила тяжести и центробежная сила более крупных кусков будут преобладать над магнитной силой, и эффективность процесса сепарации будет неизбежно снижаться.

Рис. 1. Изменение плотности куска, содержащего одинаковое число ПК, от его размера

При применении предконцентрации руд посредством гравитационной сепарации, прошедших, например, стадию среднего дробления, необходимо учитывать текстуру рудного материала — размеры и расположение минералов, содержащих ПК, и тип включения содержащихся в них минералов с ПК.

Наиболее эффективным гравитационное разделение будет в случае неоднородной текстуры при крупности разделяемых кусков, близкой к крупности минералов, содержащих ПК. Только при соблюдении этого условия плотность выделяемых кусков, основного параметра разделения при гравитационном обогащении, будет близка к плотности минералов, содержащих ПК. Следовательно, для предконцентрации посредством гравитационной, так же, как магнитной сепарации, важное значение имеет модуль крупности кусков, поскольку куски, содержащие одинаковое число ПК, но отличающиеся по размеру, могут попадать при сепарации в разные продукты. Подтверждает выдвинутое положение **рис. 1**, демонстрирующий изменение плотности куска, содержащего одинаковое число ПК, от его размера и вероятности формирования потерь ПК при гравитационной предконцентрации.

При проведении процесса предконцентрации руд посредством радиометрической сепарации кускового материала, реализуемой на основе эмиссионных методов, также требуется классификация материала по крупности.

Схема, представленная на **рис. 2**, показывает, что от двух одинаковых по качеству образцов будут регистрироваться разные по величине сигналы, поскольку, исходя из законов распространения излучения [9], его интенсивность падает пропорционально квадрату расстояния от источника до исследуемой поверхности $I = P/(4\pi r^2)$, где P — мощность излучения; r — расстояние от источника излучения до исследуемой поверхности.

В рассматриваемом варианте падение регистрируемого от образцов сигнала вторичного излучения обусловлено, во-первых, снижением интенсивности первичного излучения, пропорционального второй степени расстояния R_1 (или R_2) от источника первичного излучения I до поверхности образца обр.1 (или обр.2); во-вторых, изменением уровня интенсивности взаимодействия первичного излучения с веществом образца, сказывающегося

Рис. 2. Схема облучения кусков рудной массы первичным источником и регистрации вторичного излучения от них

на начальной интенсивности вторичного излучения от образца; в-третьих, падением интенсивности вторичного излучения, пропорционального второй степени расстояния r_1 (или r_2) от поверхности образца до детектора вторичного излучения $Д$. В случае $R_1 > R_2$ и $r_1 > r_2$ интенсивность взаимодействия первичного излучения с веществом образца горной породы снижается пропорционально второй степени расстояния R_1 , в результате чего начальная интенсивность вторичного излучения также снижается, и дальнейшее ее уменьшение происходит пропорционально второй степени расстояния r_1 . В итоге интенсивность вторичного излучения, регистрируемого детектором, будет определяться по формуле

$$I = \frac{P}{16\pi^2 R^2 r^2}, \quad (7)$$

где R — расстояние от источника первичного излучения до поверхности исследуемого образца; r — расстояние от поверхности исследуемого образца до детектора.

Из этого следует, что эффективная реализация процесса предконцентрации посредством радиометрической сепарации может быть успешной только при незначительной разнице в крупности кусков, а именно: при соблюдении модуля крупности кусков в продукте, поступающем на сепарацию, на уровне 1,5–2 (до 2,5) отн. ед.

Таким образом, приведенные данные позволяют сформулировать следующие методические положения по оценке целесообразности включения в технологию переработки руд процесса предконцентрации, реализуемого с использованием гравитационных, магнитных или радиометрических свойств минералов. Они заключаются в следующем.

1. Необходимо изучение распределения содержания ПК в кусковом материале добытой горной массы каждого класса крупности и изменения показателя контрастности M , характеризующего уровень неравномерности распределения ПК в кусках, направляемых на сепарацию.

2. Требуется установление уровня присутствия в сепарируемом материале кусков с содержанием ПК ниже бортового посредством показателя наличия пустых пород N .

3. Необходим совместный анализ показателей контрастности M и наличия пустых пород N .

4. Требуется изучение возможности поддержания модуля крупности кускового материала в каждом сепарируемом классе на уровне не выше 2,5 усл. ед.

Выдвинутые положения обеспечивают принятие обоснованного решения по использованию процесса предконцентрации на конкретном объекте.

Практика применения кусковой сепарации при реализации процессов предконцентрации руд

Горным институтом КНЦ РАН на протяжении последних лет проведен ряд исследований по оценке эффективности реализации процессов предконцентрации посредством тяжелосредной, люминесцентной и магнитной сепарации апатитсодержащих, хромитовых и железных руд месторождений Кольского п-ва, а также отходов горного производства, находящихся в отвалах вскрышных пород. Теоретически обоснованный подход к оценке целесообразности реализации процессов кускового предварительного обогащения, основанный на расчете и анализе показателей M и N , подготовка материала к сепарации (его классификация с учетом оптимального модуля крупности) позволили провести оценку эффективности процесса предконцентрации железосодержащих, апатитсодержащих и лопаритовых руд посредством сепарации их кускового материала, основанной на использовании его гравитационных, магнитных или радиометрических свойств.

Железосодержащие руды

На Кольском п-ве железорудное сырье представлено запасами Оленегорского рудного поля и Ковдорского массива.

Ковдорское месторождение апатит-магнетитовых руд имеет сложное строение, что обусловлено многочисленными жильными ответвлениями рудных тел во вмещающие породы, неравномерным распределением ценных компонентов, регламентирующих качество руд, и высокой изменчивостью оруденения. Эти особенности обуславливают колебание качества добытой рудной массы и необходимость формирования рудопотока регламентируемого качества перед процессами обогащения. Сегодня на Ковдорском ГОКе, эксплуатирующем данное месторождение, проблему управления качеством решают посредством реализации усреднительного принципа. На усреднительный склад поступает рудная масса крупностью менее 20 мм, стабилизация качества здесь происходит за счет перемешивания разнокачественных слоев при торцовой разгрузке [10]. Основным недостатком данного метода формирования качества рудопотока является то, что усредняется вся добытая рудная масса вместе с входящими в ее состав пустыми и слабоминерализованными породами, объем которых имеет тенденцию к росту. Увеличенный объем пород, размещенных на усреднительном складе, неизбежно попадает в технологический процесс и выводится из него при обогащении в виде тонкоизмельченных отходов, повышая затраты на производство концентрата и неоправданно снижая

Технологические показатели сухой магнитной сепарации класса –100+50 мм

Продукт	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Fe _{общ}	Fe _{магн}	Fe _{гем}	Fe _{общ}	Fe _{магн}	Fe _{гем}
Магнитный	74,3	32,6	21,2	9,6	95	98,9	96
Породный	25,7	4,9	0,7	1,7	5	1,1	4
Исходная руда	100	25,5	15,9	7,6	100	100	100

продолжительность эксплуатации хвостохранилища [11, 12]. Кроме того, тонкоизмельченные отходы по сравнению с отвалами кусковых пород в большей степени загрязняют окружающую среду за счет пыления и требуют значительных затрат на складирование и хранение [13].

Анализ кускового материала маложелезистых руд Ковдорского железорудного месторождения показал их высокую контрастность по содержанию Fe – $M > 0,8$, при этом значение показателя N составило 0,92. Этот факт позволил реализовать поисковые исследования по применению кусковой сепарации, продемонстрировавшие эффективность процесса. Предложена схема предконцентрации на основе кусковой магнитной сепарации с выделением до 20 % слабоминерализованных пород и до 22 % обогащенного продукта с кондиционным содержанием Fe 18,41 %. Из промпродукта, полученного в процессе сухой магнитной сепарации, с использованием рентгенолюминесцентной сепарации можно выделить из процесса дальнейшей переработки в отходы не менее 20 % кускового материала, содержащего менее 2 % P_2O_5 . Полученный после рентгенолюминесцентной сепарации продукт с повышенным содержанием P_2O_5 может быть направлен на дальнейшее обогащение для получения апатитового и бадделеитового концентратов.

Расчетное значение показателя M для железистых кварцитов месторождения Оленегорское крупностью –100+50 мм, равное 0,61, свидетельствует о невысокой неравномерности содержания ПК в кусках. Следуя классификации проф. В. А. Мокроусова [6], можно сделать вывод о средней их обогатимости. Однако расчетное значение показателя N , равное 0,77, указывает на наличие в рудной массе слабоминерализованных пород и возможность реализации кусковой сепарации.

Результаты поисковых исследований по применению сухой магнитной сепарации железистых кварцитов, проведенных с использованием лабораторного барабанного магнитного сепаратора серии СМБС-Л, подтвердили теоретические расчеты и возможность выделения не менее 25 % слабоминерализованных пород при извлечении в кусковой концентрат магнитной сепарации 98,96 % Fe_{магн} (см. таблицу).

Хромитовые и лопаритовые руды

Проведенные в Горном институте КНЦ РАН исследования показали возможность использования процессов тяжелосредной сепарации (ТСС) в качестве способа предконцентрации хромитовых и лопаритовых руд. Применение тяжелосредной сепарации для хромитовых руд *Сопчеозерского месторождения* (Кольский п-ов) [14] позволило в процессе предконцентрации выделить кусковой (–100 мм) концентрат с содержанием Cr_2O_3 около

40 %, по своим параметрам пригодный для получения ферросплавов, и вывести из технологического процесса 22,5 % пород.

Изучение эффективности использования ТСС для подготовки лопаритовых руд к обогащению показало возможность повышения качества исходной руды в 2,2 раза (с 1,8 до 3,95 %), при этом содержание лопарита в легкой (отвальной) фракции не превышает 0,5–0,55 %, что находится на уровне отвальных мелкозернистых хвостов обогатительной фабрики «Карнасурт» [15].

Апатитсодержащие руды

Исследованиями, проведенными в Горном институте КНЦ РАН в период с 1984 по 2020 г. по изучению возможности предконцентрации апатитсодержащих руд *Хибинских месторождений*, доказана эффективность ее реализации посредством покусковой рентгенолюминесцентной сепарации (РЛС), обеспечивающей выделение из технологического процесса более 20 % пустых и слабоминерализованных пород. При этом в 1,2–1,63 раза повышается содержание P_2O_5 в продукте, направляемом на обогащение [16]. Кроме того, сравнительные исследования дробимости и измельчаемости апатитсодержащих руд Хибинского массива, прошедших и не прошедших сепарацию, показали снижение на 44 % энергозатрат на дробление 1 т обогащенной в процессе предконцентрации руды и на 5 % при ее измельчении от соответствующих величин при обработке исходной руды [17].

Углубленная экономическая оценка целесообразности отработки апатитсодержащих руд месторождения Олений Ручей в Хибинах с включением в процесс формирования качества руды перед процессами переработки передела предконцентрации свидетельствует об эффективности разработанной технологии с ожидаемым годовым экономическим эффектом 239,1 млн руб., а с учетом возможного снижения себестоимости обогащения минимум на 5 % – 243,5 млн руб.

Заключение

Таким образом, установлено, что выдвинутые теоретические положения позволяют внедрить научно обоснованный подход к изучению возможности реализации процесса предконцентрации посредством сепарации кускового материала горных пород, основанной на использовании его гравитационных, магнитных или радиометрических свойств, для принятия решения по ее применению на конкретном объекте.

Результаты исследований по использованию в технологии добычи и переработки апатитсодержащих, железных, хромитовых и лопаритовых руд процесса предконцентрации продемонстрировали возможность повышения качества рудопотока, направляемого на обогатительные фабрики, за счет выделения не менее 20 % пустых и слабоминерализованных пород, при сохранении высоких показателей извлечения полезных компонентов. Введение в технологию процесса кусковой сепарации добытой горной массы оказывает положительное влияние на эффективность ее дробления и измельчения, а также на экологическую обстановку в районе ГОКов вследствие вывода в отходы крепких пород, содержащих темнокветные минералы и опосредованно влияющих на уменьшение количества тонкоизмельченных отходов обогащения.

Библиографический список

1. Robben C., Wotruba H. Sensor-Based Ore Sorting Technology in Mining—Past, Present and Future // *Minerals*. 2019. Vol. 9. Iss. 9. 523. DOI: 10.3390/min9090523
2. Knapp H., Neubert K., Schropp C., Wotruba H. Viable Applications of Sensor-Based Sorting for the Processing of Mineral Resources // *ChemBioEng Reviews*. 2014. Vol. 1. No. 3. P. 86–95.
3. Broicher H. F. Ore and waste identification and quality control by means of laser induced fluorescence // *CIM Bulletin*. 1999. Vol. 92. Iss. 1034. P. 59–63.
4. Grotowski A., Witecki K. Research on the Possibility of Sorting Application for Separation of Shale and/or Gangue from the Feed of Rudna Concentrator // *Mineral Engineering Conference*. 2017. E3S Web of Conferences. 2017. Vol. 18. 01004. DOI: 10.1051/e3sconf/201712301004
5. Короткевич В. А., Кухаренко И. Е., Беляк А. А., Короткевич Е. В. Инновационные технологии и оборудование в предварительном обогащении минерального сырья // *Добычающая промышленность*. 2017. № 2. С. 168–172.
6. Мокроусов В. А., Лилев В. А. Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд. — М.: Недра, 1979. — 192 с.
7. Павлишина Д. Н. Управление качеством руд с использованием радиометрических методов контроля содержания полезных компонентов (на примере месторождения «Олений Ручей»): дис. ... канд. техн. наук. — Апатиты, 2016. — 143 с.
8. Кармазин В. И., Кармазин В. В. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых: учебник. — 3-е изд. — М.: Горная книга, 2017. Т. 1. Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых. — 672 с.

9. Ландсберг Г. С. Оптика: учебник. — 7-е изд. — М.: Физматлит, 2017. — 852 с.
10. Сединин Д. Ф., Тесля А. С., Устинов В. К., Ерюхин Н. В., Лагутин П. Г. Реконструкция дробильной фабрики с увеличением мощности и строительством усреднительного склада мелкодробленой руды // *Горный журнал*. 2012. № 10. С. 65–68.
11. Терещенко С. В., Марчевская В. В., Павлишина Д. Н. Пути снижения негативного воздействия горного производства на окружающую природную среду // *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2016. № 4(27). С. 62–66.
12. Lu Liming. Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. — Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. — 641 p.
13. Eremin D. Ecological foundations for use of mining and metallurgical industry slags in fields of Western Siberia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 194. No. 9. 092006. DOI: 10.1088/1755-1315/194/9/092006
14. Кормилицын С. П., Попов В. А., Ракаев А. И., Кулаков А. Н. и др. Разработка технологии переработки хромитового сырья // *Балтийские металлы*. 2003. Вып. 1. С. 15–17.
15. Ракаев А. И., Алексеева С. А., Черноусенко Е. В., Морозова Т. А. Вывод крупнокусковых хвостов на стадии рудоподготовки при обогащении редкометалльных руд // *Инновационные процессы в технологиях комплексной, экологически безопасной переработки минерального и нетрадиционного сырья (Плакские чтения-2009): матер. междунар. совещания.* — Новосибирск: Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 2009. С. 119–120.
16. Терещенко С. В. Основные положения теории люминесцентной сепарации минерального сырья. — Апатиты: Изд-во Горного института КНЦ РАН, 2002. — 145 с.
17. Терещенко С. В., Марчевская В. В., Шibaева Д. Н., Аминов В. Н. Ресурсосберегающая технология обогащения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива // *Обогащение руд*. 2018. № 3. С. 32–38. DOI: 10.17580/or.2018.03.06 **ГЖ**

«GORNYI ZHURNAL», 2020, № 9, pp. 60–65
DOI: 10.17580/gzh.2020.09.08

Ore quality improvement by pre-concentration: Theory and practice

Information about authors

S. V. Tereshchenko¹, Head of Laboratory, Doctor of Engineering Sciences, tereshchenko@goi.kolasc.net.ru

D. N. Shibaeva¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences

¹Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract

The paper shows the application prospects for the preliminary ore concentration technology in the conditions of quality degradation of minerals. The technology is based on partial removal gangue and rocks with poor mineral content at early processing stages. The technology potential is obvious because its introduction creates the conditions for the formation of an adjustable quality ore flow before beneficiation.

The paper formulates the theoretical statements to allow efficiency evaluation of pre-concentration within a beneficiation technology by coarse waste rejection from mined rocks by size-based separation using gravitational, magnetic, or radiometric properties of rocks. To this end, it is necessary: to study distribution of useful components in each size and the contrast index (M) which is a characteristics of uneven distribution of useful components in rocks sent for separation; to identify the content of useful components below the cutoff grade in size grades by calculating the gangue number (N); to analyze jointly the indicators M and N; to study maintainability of the size modulus of bulk material in each separated class at the level of 2.5 arbitrary units toward the justified use of the pre-concentration in a certain mine.

The studies on size-based separation of apatite, iron, chromite and loparite ores have demonstrated feasibility of quality improvement in the ore flow to the processing plant by at least 1.3 times, by separating at least 20% of gangue and rocks with low mineral content while maintaining high rates of useful component recovery.

Keywords: pre-concentration, size-based separation, magnetic methods, gravity methods, radiometric methods, size modulus, contrast index, gangue number.

References

1. Robben C., Wotruba H. Sensor-based ore sorting technology in mining—Past, present and future. *Minerals*. 2019. Vol. 9. Iss. 9. 523. DOI: 10.3390/min9090523
2. Knapp H., Neubert K., Schropp C., Wotruba H. Viable applications of sensor-based sorting for the processing of mineral resources. *ChemBioEng Reviews*. 2014. Vol. 1. No. 3. pp. 86–95.

3. Broicher H. F. Ore and waste identification and quality control by means of laser induced fluorescence. *CIM Bulletin*. 1999. Vol. 92, Iss. 1034. pp. 59–63.
4. Grotowski A., Witecki K. Research on the Possibility of sorting application for separation of shale and/or gangue from the feed of Rudna Concentrator. *Mineral Engineering Conference*. 2017. E3S Web of Conferences. 2017. Vol. 18. 01004. DOI: 10.1051/e3sconf/201712301004
5. Korotkevich V. A., Kухarenko I. E., Belyak A. A., Korotkevich E. V. Technological innovations and novel equipment in mineral pre-treatment. *Dobyvayushchaya promyshlennost*. 2017. No. 2. pp. 168–172.
6. Mokrousov V. A., Lileev V. A. Nonradioactive ore dressing by radiometry. Moscow: Nedra, 1979. 192 p.
7. Pavlishina D. N. Ore quality control by radiometry of useful components. A case-study of Oleniy Ruchey deposit: thesis of inauguration of Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. Apatity, 2016. 143 p.
8. Karmazin V. V., Karmazin V. I. Magnetic, electrical and special methods for mineral processing: Textbook. 3rd ed. Moscow: Gornaya kniga, 2017. Vol. 1. Magnetic and electrical methods for mineral processing. 672 p.
9. Landsberg G. S. Optics: Textbook. 7th ed. Moscow: Fizmatlit, 2017. 852 p.
10. Sedinin D. F., Teslya A. S., Ustimov V. K., Eryukhin N. V., Lagutin P. G. Reconstruction of the crushing plant with increasing of capacity and construction of the homogenization stockpile of the finely-broken ore. *Gornyi Zhurnal*. 2012. No. 10. pp. 65–68.
11. Tereshchenko S. V., Marchevskaya V. V., Pavlishina D. N. Ways to reduce negative environmental impact of mining industry. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2016. No. 4(27). pp. 62–66.
12. Lu Liming. Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. 641 p.
13. Eremin D. Ecological foundations for use of mining and metallurgical industry slags in fields of Western Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 194, No. 9. 092006. DOI: 10.1088/1755-1315/194/9/092006
14. Kormilitsyn S. P., Popov V. A., Rakaev A. I., Kulakov A. N. Processing technology for chromite-bearing minerals. *Baltiyskie metalli*. 2003. Vol. 1. pp. 15–17.
15. Rakaev A. I., Alekseeva S. A., Chernousenko E. V., Morozova T. A. Size-based separation of coarse tailings at the pretreatment stage of rare earth ore processing. *Technological innovations in Integrated and Ecologically Safe Processing of Minerals and Nonconventional Materials (Plaksin's Lectures-2009): International Conference Proceedings*. Novosibirsk: Institut gornogo dela im. N. A. Chinalaka SO RAN, 2009. pp. 119–120.
16. Tereshchenko S. V. Luminescent separation: Key theoretical provisions. Apatity: Izdatelstvo Gornogo instituta KNTs RAN, 2002. 145 p.
17. Tereshchenko S. V., Marchevskaya V. V., Shibaeva D. N., Aminov V. N. Resource-saving dressing technology for apatite-nepheline ores of the Khibiny massif. *Obogashchenie Rud*. 2018. No. 3. pp. 32–38. DOI: 10.17580/or.2018.03.06